

УДК 62-831.2

# ВЕКТОРНО-АЛГОРИТМИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Т.М. Халина, М.И. Стальная, С.Ю. Еремочкин

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

E-mail: Vens-1@vandex.ru

Рассмотрен векторно-алгоритмический метод расчета электрической мощности и электромагнитного момента на валу трехфазного асинхронного короткозамкнутого электродвигателя при его питании от однофазной сети переменного тока. Сформулирован алгоритм расчета мощности и электромагнитного момента электродвигателя при векторно-алгоритмическом управлении.

**Ключевые слова:**

Векторно-алгоритмическое управление, векторно-алгоритмический метод, расчет электрической мощности и электромагнитного момента, асинхронный короткозамкнутый электродвигатель.

**Key words:**

*Vector-algorithmic control, vector-algorithmic method, calculation of electric power and electromagnetic torque, asynchronous short-circuited electric motor.*

Для электрификации фермерских хозяйств применяют простые и экономичные решения по распределению электроэнергии. Для отдельных отдаленных маломощных хозяйств экономически оправдано применение однофазной системы электроснабжения [1, 2].

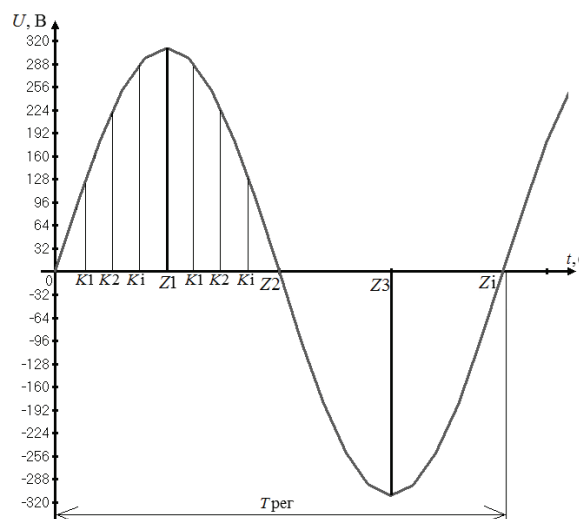
При непосредственном питании от однофазной сети переменного тока для запуска, работы и регулирования скорости трехфазного асинхронного короткозамкнутого электродвигателя целесообразно использовать специальные схемы питания, на основе векторно-алгоритмического управления [3, 4]. Однако использование известных методик расчета мощности и электромагнитного момента электродвигателя невозможно по причине несинусоидальной формы напряжения, поступающего на обмотки электродвигателя, и неравенства напряжения на разных статорных обмотках. В связи с этим был разработан специализированный векторно-алгоритмический метод расчета мощности и электромагнитного момента трехфазного электродвигателя, питающегося от однофазной сети, при векторно-алгоритмическом управлении [5].

Прежде всего, задаются параметры электродвигателя: номинальное напряжение  $U_n$ , число полюсов  $p$ , частота питающей сети  $f_{сет}$ , количество промежутков коммутации  $Z$  в одном полупериоде частоты регулирования, количество участков тактирования  $K$  в каждом промежутке коммутации  $Z$  (рис. 1). Количество промежутков коммутации  $Z$  одинаково для каждой из трех обмоток ( $A, B, C$ ).

Рассчитываются величина промежутка  $Z_i$  в градусах (секундах), величина одного участка тактирования внутри участка коммутации  $Z_i$  в градусах (секундах), причем число участков тактирования  $K$  в каждом из промежутков коммутации  $Z_i$  полупериода питающей сети является постоянной величиной.

Определяется способ соединения статорных обмоток электродвигателя – треугольник или звезда,

причем алгоритм расчета для каждого способа соединения статорных обмоток различный.



**Рис. 1.** Осциллограмма напряжения, поясняющая формирование промежутков коммутации и участков тактирования

Алгоритм расчета для соединения статорных обмоток электродвигателя в треугольник. В каждый из промежутков коммутации  $Z_i$  определяется для каждой из обмоток приложенное к ней напряжение  $U_{обм,i}$  и при этом учитывается направление протекающего по ней тока, а, следовательно, и потока. Всегда для одной из обмоток напряжение будет либо  $+U_m \sin \omega t_i$ , либо  $-U_m \sin \omega t_i$ , а для двух других – либо  $+\frac{U_m}{2} \sin \omega t_i$ , либо  $-\frac{U_m}{2} \sin \omega t_i$ . В течение всего времени  $t_i$  внутри участка  $K_j$  напряжение считается постоянным. При этом на каждом из  $K_j$  участков тактирования значения напряжения в конце участка находятся по формуле:

$$U = U_m \sin \omega t_i, \quad (1)$$

где  $U_m$  – максимальное значение питающего синусоидального напряжения, поступающего на статор-

ные обмотки электродвигателя;  $\omega$  – угловая частота переменного питающего напряжения.

$$U_m = \sqrt{2}U_{\text{сети}}; \quad (2)$$

$$\omega = 2\pi f, \quad (3)$$

где  $f$  – частота напряжения сети, 50 Гц.

В каждом из  $Kj$  участков тактирования производится векторное сложение полученных значений напряжений по теореме косинусов:

$$U_a + U_b = \sqrt{U_a^2 + U_b^2 + 2U_a U_b \cos \alpha}. \quad (4)$$

Причем сначала производится векторное сложение по теореме косинусов двух значений с напряжением либо  $+\frac{U_m}{2}\sin\omega t_i$ , либо  $-\frac{U_m}{2}\sin\omega t_i$ .

Угол между ними  $\alpha=120^\circ$ , значения напряжения на обмотках берутся по модулю. Затем к рассчитанному значению прибавляется третье значение напряжения либо  $+U_m\sin\omega t_i$ , либо  $-U_m\sin\omega t_i$ , взятое также по модулю в направлении тока, протекающего по этой обмотке, по формуле:

$$U_{KjZiABC} = \sum_0^j (U_{KjZiA} + U_{KjZiB} + U_{KjZiC}), \quad (5)$$

где  $U_{KjZiABC}$  – суммарное значение векторов напряжения статорных обмоток электродвигателя на участке тактирования  $Kj$  в промежутке коммутации  $Zi$ ;  $i$  – количество промежутков коммутации  $Z$  в периоде регулирования;  $j$  – количество участков тактирования  $K$  в промежутке коммутации  $Zi$ ;  $U_{KjZiA}$ ,  $U_{KjZiB}$ ,  $U_{KjZiC}$  – значения вектора напряжения обмотки  $A$ ,  $B$  и  $C$  соответственно на участке тактирования  $Kj$  в промежутке коммутации  $Zi$ .

Алгоритм расчета для соединения статорных обмоток электродвигателя в звезду. В каждый из промежутков коммутации  $Zi$  определяется для каждой из обмоток приложенное к ней напряжение  $U_{\text{обм}}$  с учетом направления протекающего по ней тока: либо  $+U_m\sin\omega t_i$ , либо  $-U_m\sin\omega t_i$ , либо  $U_{\text{обм}}=0$  (обмотка не работает).

На каждом из  $Kj$  участков тактирования значения напряжения находятся по формуле (1). Значения  $U_m$  и  $\omega$  определяются по формулам (2) и (3) соответственно. В каждом из  $Kj$  участков тактирования производится векторное сложение полученных значений напряжений по формуле (4). В формуле (4) все значения напряжений на статорных обмотках электродвигателя берутся по модулю.

Если напряжение на двух обмотках  $U_{\text{обм}}=0$ , то результирующим будет напряжение на третьей обмотке. Если напряжение на одной из обмоток  $U_{\text{обм}}=0$ , то угол между двумя другими векторами будет либо  $\alpha=120^\circ$  при одинаковом направлении токов в обмотках (положительном или отрицательном), либо  $\alpha=60^\circ$  при разным направлении токов в обмотках.

Если напряжение есть на всех трех обмотках, то сначала суммируются вектора напряжений двух обмоток с положительным направлением тока или с отрицательным направлением тока, причем угол между данными векторами составляет  $\alpha=120^\circ$ . За-

тем к полученному значению прибавляется напряжение на третьей обмотке ( $\alpha=0^\circ$ ) по модулю. Таким образом, получают суммарное значение напряжения на статорных обмотках в каждый из  $Kj$  участков, формула (5).

Далее порядок расчета одинаков и для схемы соединения статорных обмоток «звезда», и для схемы «треугольник». Находится суммарное значение векторов напряжения статорных обмоток электродвигателя в периоде регулирования  $\Sigma U_{1\phi}$  по формуле:

$$\Sigma U_{1\phi} = \sum_0^i (U_{Z1} + U_{Z2} + \dots + U_{Zi}), \quad (6)$$

где  $U_{Zi}$  – суммарное значение векторов напряжения трех статорных обмоток электродвигателя в периоде коммутации  $Zi$ .

Формулу (6) можно представить в виде:

$$\Sigma U_{1\phi} = \sum_0^i ((U_{Z1A} + U_{Z1B} + U_{Z1C}) + (U_{Z2A} + U_{Z2B} + U_{Z2C}) + \dots + (U_{ZiA} + U_{ZiB} + U_{ZiC})),$$

где  $U_{Zi}$  – суммарное значение векторов напряжения трех статорных обмоток электродвигателя в периоде коммутации  $Zi$ .

Причем полученные после векторного сложения значения напряжения на каждом из  $Kj$  участков тактирования в периоде коммутации  $Zi$  суммируются по формуле:

$$\begin{aligned} \Sigma U_{1\phi} = & \sum_0^i \sum_0^j (((U_{K1Z1A} + U_{K1Z1B} + U_{K1Z1C}) + \\ & + (U_{K2Z1A} + U_{K2Z1B} + U_{K2Z1C}) + \dots + \\ & + (U_{KjZ1A} + U_{KjZ1B} + U_{KjZ1C})) + \\ & + ((U_{K1Z2A} + U_{K1Z2B} + U_{K1Z2C}) + (U_{K2Z2A} + U_{K2Z2B} + \\ & + U_{K2Z2C}) + \dots + (U_{KjZ2A} + U_{KjZ2B} + U_{KjZ2C})) + \\ & + ((U_{K1ZiA} + U_{K1ZiB} + U_{K1ZiC}) + (U_{K2ZiA} + \\ & + U_{K2ZiB} + U_{K2ZiC}) + \dots + (U_{KjZiA} + U_{KjZiB} + U_{KjZiC}))), \end{aligned}$$

где  $U_{KjZi}$  – суммарное значение векторов напряжения трех статорных обмоток электродвигателя в участке тактирования  $Kj$  в промежутке коммутации  $Zi$ .

Среднее значение вектора напряжения  $U_{\text{ср.1}\phi}$  на статорных обмотках в периоде регулирования электродвигателя, питающегося от однофазного источника электроэнергии, находится по формуле:

$$U_{\text{ср.1}\phi} = \frac{\Sigma U_{1\phi}}{i \cdot j}.$$

Как известно [6], электромагнитный момент электродвигателя определяется по формуле:

$$M = \frac{m_1 U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{\omega_0 \left[ \left( r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]}, \quad (7)$$

где  $U_1$  – значение напряжения на статорных обмотках электродвигателя.

При постоянных значениях активного и индуктивного сопротивлений обмотки статора, реактивного сопротивления рассеяния, скольжения и оборотов электродвигателя можно считать, что момент пропорционален квадрату приложенного напряжения, то есть:

$$M \equiv U_1^2. \quad (8)$$

С учетом формул (7) и (8) можно найти отношение моментов, развиваемых электродвигателем при питании от однофазной и трехфазной сети, как отношение напряжения  $U_{\text{ср.1ф}}$  к среднему значе-

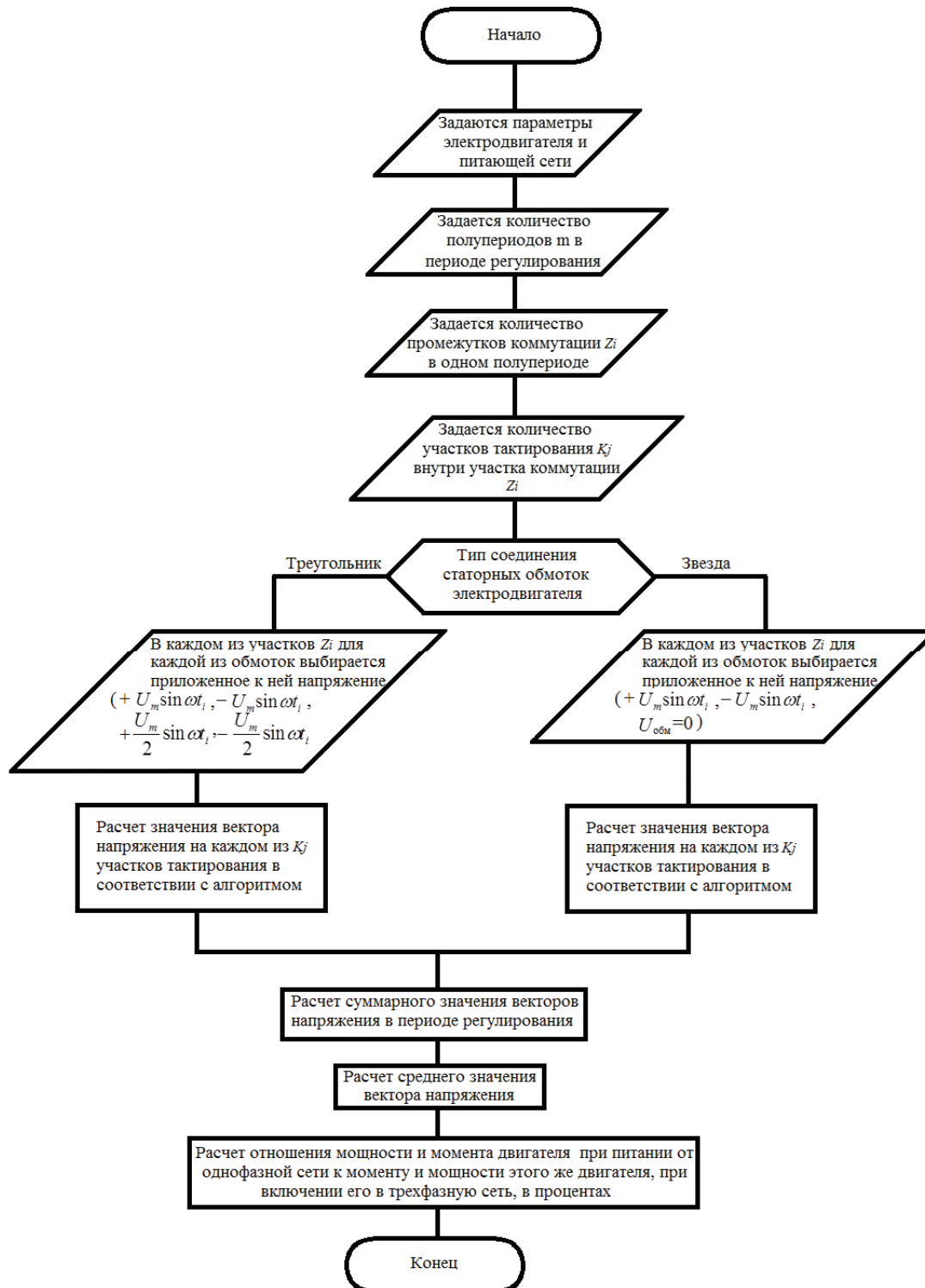


Рис. 2. Обобщенная блок-схема алгоритма расчета мощности и электромагнитного момента, развиваемого электродвигателем при векторно-алгоритмическом управлении

нию вектора напряжения, вычисленного по выше-приведенной методике, но при включении двигателя в трехфазную сеть:

$$\frac{M_{1\phi}}{M_{3\phi}} = \frac{U_{\text{ср.1}\phi}^2}{U_{\text{ср.3}\phi}^2} 100 \%, \quad (9)$$

где  $M_{1\phi}$  и  $M_{3\phi}$  — момент, развиваемый электродвигателем при питании от одно- или трехфазной сети;  $U_{\text{ср.3}\phi}$  — среднее значение вектора напряжения на статорных обмотках электродвигателя при питании от трехфазного источника электроснабжения.

Как известно, мощность на валу электродвигателя определяется развиваемым электродвигателем моментом и скоростью, в соответствие с формулой:

$$P \approx M_{\text{дв}} \omega. \quad (10)$$

Тогда при  $\omega = \text{const}$ , с учетом формул (8) и (10), получаем:

$$\begin{aligned} P_{1\phi} &\approx M_{1\phi} \omega; \\ P_{3\phi} &\approx M_{3\phi} \omega, \end{aligned}$$

где  $P_{1\phi}$  и  $P_{3\phi}$  — мощность на валу электродвигателя, питающегося от одно- или трехфазной сети.

Из формул (7)–(10) отношение мощности  $P_{1\phi}$  к мощности  $P_{3\phi}$  находится по формуле:

$$\frac{P_{1\phi}}{P_{3\phi}} = \frac{M_{1\phi}}{M_{3\phi}} = \frac{U_{\text{ср.1}\phi}^2}{U_{\text{ср.3}\phi}^2} \cdot 100 \%.$$

На основании методики расчета мощности и электромагнитного момента, развиваемого электродвигателем при векторно-алгоритмическом управлении, составлена обобщенная блок-схема алгоритма расчета (рис. 2).

На основании блок-схемы алгоритма расчет мощности и электромагнитного момента, развиваемого электродвигателем при векторно-алгоритмическом управлении, возможно написание специализированной программы расчета.

### Выводы

Предложен векторно-алгоритмический метод, позволяющий производить расчет как численного, так и относительного значения электрической мощности и электромагнитного момента на валу трехфазного асинхронного короткозамкнутого двигателя при питании от однофазной сети при векторно-алгоритмическом управлении. Суть метода сформулирована в виде словесного алгоритма и представлена в виде блок-схемы. Показано, что преимуществом метода является возможность расчета мощности и электромагнитного момента трехфазного асинхронного электродвигателя, запуск и работа которого осуществляется от однофазной сети посредством векторно-алгоритмической коммутации статорных обмоток при отсутствии непрерывной синусоидальности напряжения, поступающего на статорные обмотки электродвигателя, а также при неравенстве напряжения по величине на разных обмотках.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коломиец А.П., Кондратьева Н.П., Владыкин И.Р., Юран С.И. Электропривод и электрооборудование. — М.: КолосС, 2006. — 328 с.
2. Khalina T.M., Stalnaya M.I., Eremochkin S.Y. The rational use of the three phase asynchronous short circuited electric motors in a single phase network // Proc. VII Intern. Conf. on Technical and Physical Problems of Power Engineering (ICTPE-2011). — Lefkosa, 2011. — № 22. — P. 105–107.
3. Однофазно-трехфазный транзисторный реверсивный коммутатор, ведомый однофазной сетью: пат. 109356 Рос. Федерация. № 2011120731/07; заявл. 23.05.2011; опубл. 27.10.2011, Бюл. № 30. — 2 с.
4. Преобразователь частоты, ведомый однофазной сетью переменного тока, для питания однофазного асинхронного двигателя: пат. 109938 Рос. Федерация. № 2011120730/07; заявл. 23.05.2011; опубл. 10.10.2011, Бюл. № 30. — 2 с.
5. Еремочкин С.Ю., Стальная М.И. Векторно-алгоритмический метод круговых диаграмм для расчета электрической мощности и электромагнитного момента на валу трехфазного асинхронного короткозамкнутого двигателя при питании от однофазной сети // Наука и молодежь-2011: Матер. VIII Всеросс. научно-техн. конф. — Барнаул, 2011. URL: <http://edu.secna.ru/publication/5/release/54/attachment/21/> (дата обращения: 14.02.2012).
6. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. — М.: Энергоатомиздат, 1981. — 586 с.

Поступила 17.02.2012 г.